

Gestión natural de inundaciones

Natural Flood Management

Luisa Fernanda Parra-Gómez^{1a}, Freddy Leonardo Franco-Idárraga^{1b}

¹ Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia. Orcid: [0009-0003-6759-1730](https://orcid.org/0009-0003-6759-1730)^a, [0000-0001-7416-0769](https://orcid.org/0000-0001-7416-0769)^b.
Correos electrónicos: lfparrag@unal.edu.co^a, flfrancoi@unal.edu.co^b.

Recibido: 7 octubre, 2023. Aceptado: 12 marzo, 2024. Versión final: 23 mayo, 2024.

Resumen

En esta investigación se evalúan estrategias de gestión natural de inundaciones en una cuenca de montaña andina, quebrada Olivares-Minitas en Manizales, Colombia; para cuantificar la eficacia de su aplicación disminuyendo crecientes. Modelaciones hidrológicas e hidráulicas se realizaron simultáneamente en el software Iber, planteando diversos escenarios hidrológicos para tres alternativas de gestión natural de inundaciones: (1a) dar espacio al cauce eliminando las contracciones y limitaciones generadas por estructuras tipo puentes, (2a) cambiar la cobertura vegetal de la parte alta de la cuenca, aumentando la rugosidad e infiltración del suelo y (3a) reconectar el cauce con sus llanuras de inundación permitiendo que allí disipe flujos y energía. Al aplicar dichas estrategias, las simulaciones resultaron en la disminución de caudales punta y retraso en los tiempos pico en los hidrogramas, por lo que se puede concluir que, a partir de este tipo de soluciones de rehabilitación del cuerpo hídrico, es posible mitigar el riesgo por inundaciones logrando un beneficio en la reducción de las inundaciones y en la mejora del cauce y su ecosistema a largo plazo.

Palabras clave: gestión del riesgo; gestión natural de inundaciones; restauración de ríos; modelación hidrológica e hidráulica.

Abstract

This research evaluates natural flood management strategies in a mountain basin, the Olivares-Minitas creek in Manizales, Colombia, to quantify the effectiveness of their application in reducing floods. Hydraulic and hydrological modeling was performed simultaneously in Iber software. Multiple scenarios were proposed for three natural flood management alternatives: (1) making room for the channel, eliminating contractions and structures limitations, (2) changing the vegetation cover of the upper part of the basin, increasing the ground roughness, and (3) reconnect the stream with their floodplains, allowing the stream to dissipate flow and energy. Applying these strategies, the simulations resulted of the decrease the high discharges and the delay in peak times for the hydrographs. In conclusion, from natural solutions like rehabilitating, recovering the water body, and their ecosystem, is possible to manage and reduce the flooding risk, Attaining benefits through long-term reduction of flooding and enhancement of the river and its ecosystem.

Keywords: Risk Management; Natural Flood Management; River Restoration; Hydraulic and Hydrological Modeling; Iber; distributed hydrological model.

1. Introducción

Las inundaciones son fenómenos naturales recurrentes e inherentes a la dinámica de los ríos; sin embargo, las intervenciones antrópicas para: agricultura, minería y urbanización las ven como problemas por las pérdidas

humanas, físicas y económicas que derivan [1]. Las soluciones “clásicas” de ingeniería se centran en infraestructura de protección y defensa, que al alterar el normal funcionamiento de los cuerpos hídricos causan importantes impactos ambientales en la interrupción de flujos de energía, agua y sedimento, con retención de

estos y sus nutrientes [2], lo cual afecta dañando gravemente los ecosistemas.

Considerados fundamentales para el medio ambiente, los ríos son ahora reconocidos como patrimonio a conservar, proteger y respetar, como entidades naturales con vida y derechos, más allá de ser simplemente fuentes abastecedoras de agua [3]; por lo que en los últimos años se ha entendido que la solución no es combatir las inundaciones, sino gestionarlas; trabajando en alternativas -basadas en un mejor conocimiento de su dinámica natural- para convivir con ellas. De allí que haya surgido la gestión natural de inundaciones (Natural Flood Management) con un enfoque holístico y progresivo de trabajo con las inundaciones, utilizando los procesos hidrológicos para almacenar y desacelerar el agua, brindando beneficios significativos en reducción de caudales picos, mejoras en calidad de agua y de paso en biodiversidad [4]. Métodos que han sido estudiados por diversos autores [5], [6], [7], [8], colectando evidencia de sus ventajas en la reducción de inundaciones.

Esta investigación abordará tres estrategias de gestión natural de inundaciones: ampliar las estrecheces impuestas por infraestructura, modificar usos del suelo y reconectar el cauce a sus llanuras inundables; empleando para ello el software “Iber” de modelación hidrológica e hidráulica en el que modificado la topografía y cambiado las rugosidades del modelo computacional se simulen las estrategias mencionadas, tal que con los hidrogramas se puedan ver las reducciones del caudal pico comparadas con el escenario inicial sin estrategias para definir la(s) mejor(es) alternativa(s).

2. Materiales y métodos

2.1. Modelo utilizado

Se utilizó un programa de modelación por volúmenes finitos llamado Iber, este incluye el cálculo de la transformación de la lluvia en escorrentía, por lo tanto, es posible utilizarlo como un modelo hidrológico distribuido basado en las ecuaciones 2D de Saint Venant también conocidas como 2D Shallow Water Equations (2D-SWE).

El módulo hidrológico de Iber es completamente distribuido en el espacio y trabaja sobre la misma malla de cálculo que el módulo hidrodinámico, al que se le han añadido cálculos de precipitación e infiltración donde, el exceso de precipitación se mueve por el terreno y el cauce de acuerdo con las ecuaciones de aguas someras bidimensionales [9].

Además, los modelos distribuidos son modelos continuos que hacen posible la variación espacial de los parámetros en una superficie y permiten un análisis en cualquier punto de la cuenca [10].

El módulo hidrológico de Iber cuenta con un esquema de discretización hidrológica desacoplada con tres ecuaciones, conservación de masa y momento en X y Y, que conforman el sistema bidimensional de aguas poco profundas. Estas se presentan en la ecuación 1:

$$\begin{aligned} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} &= R - f \\ \frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_x^2}{h} + g \frac{h^2}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_x q_y}{h} \right) &= -gh \frac{\partial Z_b}{\partial x} - g \frac{n^2}{h^3} |q| q_x \\ \frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_x q_y}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_y^2}{h} + g \frac{h^2}{2} \right) &= -gh \frac{\partial Z_b}{\partial y} - g \frac{n^2}{h^3} |q| q_y \end{aligned} \quad (1)$$

Donde Z_b es la elevación del lecho, (q_x, q_y) son los dos componentes de la unidad de descarga, $|q|$ es el módulo de la unidad de descarga, h es la profundidad del agua, n es el coeficiente de Manning, g es la aceleración de la gravedad, R es la intensidad de la lluvia y f representa las pérdidas de lluvia, que pueden deberse a la infiltración, la evapotranspiración, la interceptación y la detención en la superficie.

Para hacer la simplificación de las ecuaciones se toman en cuenta las siguientes consideraciones: 1) La profundidad de la lámina de agua es pequeña en comparación con las otras dimensiones, 2) La distribución de presiones en la vertical es hidrostática, y 3) la pendiente de fondo es reducida [11]. Las pérdidas consideradas fueron:

- Interceptación: producida por depresiones del terreno, éstas se calculan en el modelo empleando la topografía representada por la malla de elementos finitos

- Infiltración: se determina a partir de la ecuación 2, dada por el SCS [12]. Consiste en una relación empírica para estimar la abstracción inicial y la escorrentía en función del tipo de suelo y el uso de este, representa el potencial de una tormenta para generar escorrentía dentro de un área de drenaje. Donde Q es la escorrentía, P es la precipitación, I_a representa la abstracción inicial y S es retención potencial máxima.

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S} \quad P > I_a \quad (2)$$

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S} \quad P > I_a$$

En la ecuación 3 se supuso una relación empírica entre la I_a y S [13].

$$QI_a = 0.2S. \quad (3)$$

A partir de la anterior suposición se tiene la ecuación 4.

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad (4)$$

Para la construcción del número de curva, el SCS decide utilizar como parámetros valores enteros que solo variaran entre 0 y 100, el NC se relaciona con el potencial máximo de retención a través de la siguiente ecuación 5 [14]:

$$NC = \frac{25.400}{S + 254} \quad (S \text{ en milímetros}) \quad (5)$$

Los números de curva para diferentes combinaciones de grupos hidrológicos de suelo y coberturas se pueden consultar en las tablas del Hydrology National Engineering Handbook [15].

- **Perdidas de carga:** son pérdidas ocasionadas por la resistencia que tiene un fluido a su paso, producida por la fricción entre las partículas del fluido y la superficie con la que tiene contacto. Uno de los métodos más utilizados para representar estas pérdidas es el coeficiente de rugosidad de Manning [16], este coeficiente varía en función del tipo de cobertura del suelo, las irregularidades presentes en el cauce, obstrucciones, régimen de circulación, etc.

Para esta modelación, se trabajan los coeficientes de rugosidad presentes en el la Guía Metodológica para el desarrollo del Sistema Nacional de Zonas Inundables del Gobierno Español publicada por el Ministerio de Medio Ambiente [17].

2.2. Zona de estudio

La cuenca de la quebrada Olivares-Minitas se encuentra en la región centro-sur del departamento de Caldas-Colombia, en el municipio de Manizales, localizada entre las coordenadas 838 939 m al oeste, 852 027 m al este, 1049 859 m al sur y 1057 793 m al norte (sistema de coordenadas proyectadas Colombia Bogotá Zone con

datum en Bogotá) [18]. Limita con los municipios de Neira y Marulanda. Tiene un área de 42.89 km², perímetro de 45.91 km y altitudes desde los 3342 m.s.n.m hasta los 1515 m.s.n.m. (ver Figura 1).

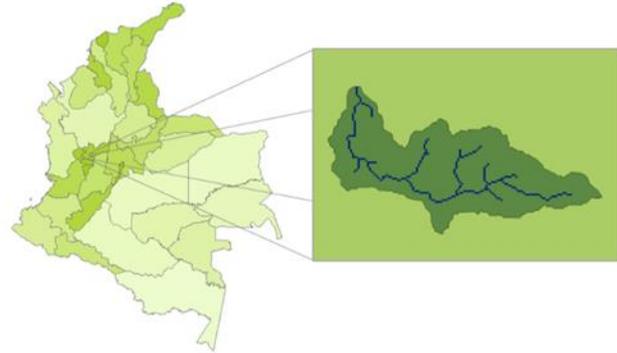


Figura 1. Ubicación de la cuenca de la quebrada Olivares-Minitas. Fuente: adaptado del IGAC [19].

Con 17.88 kilómetros entre nacimiento y desembocadura, la quebrada Olivares-Minitas inicia muy empinada -entre su cabecera y la bocatoma río Blanco- siendo parte de la reserva forestal protectora de Río Blanco, una región muy rica en biodiversidad y en contraste, una de las más amenazadas y menos estudiadas en nuestra región [20]; pero tras abandonar la reserva natural y a causa de su interacción con lo urbano, este cauce se ha visto pesadamente intervenido por actividades agrícolas, ganaderas y sobre todo de minería; además la ciudad ha ocupado sus llanuras de inundación y contraído sus espacios con puentes, canalizaciones y tuberías. Las características fisiomorfométricas de la cuenca se relacionan en la **Tabla 1**.

Tabla 1. Características fisiomorfométricas de la cuenca

Área de la cuenca	km ²	42.89
Perímetro de la cuenca	km	45.91
Cota máxima de la cuenca	msnm	3342.00
Cota de salida de la cuenca	msnm	1515.00
X centroide de la cuenca	m	1178130
Y centroide de la cuenca	m	1053510
Z centroide de la cuenca	msnm	1481.91
Diferencia de altura (cota máx. – cota min.)	m	182
Índice de Compacidad o de Gravelius	Un	1.96
Pendiente media de la cuenca (%)	%	21.13
Altura más frecuente en la cuenca	msnm	2135.5
Altura promedio de la cuenca	msnm	2356.28
Longitud de la cuenca	km	13.38
Longitud del cauce principal	km	17.88

En la cuenca la temperatura varía sustancialmente debido al amplio rango altitudinal que varía de los 3342 m.s.n.m. a los 1515 m.s.n.m, esto permite que existan climas templados, fríos y de páramo; según la clasificación de variación de temperatura por altura ideada por Francisco José de Caldas [21]. Esta condición geográfica define en gran parte su clima con un régimen bimodal de lluvias que ocurren entre marzo y mayo y entre septiembre y noviembre [22].

2.2.1. Suelos

En la cuenca de la quebrada Olivares-Minitas se presentan paisajes de montaña con relieves de tipo vertiente y valles estrechos, asociados a un clima frío húmedo y muy húmedo. Lo anterior conlleva a que se formen los suelos que se presenta en la Figura 2, con ordenes:

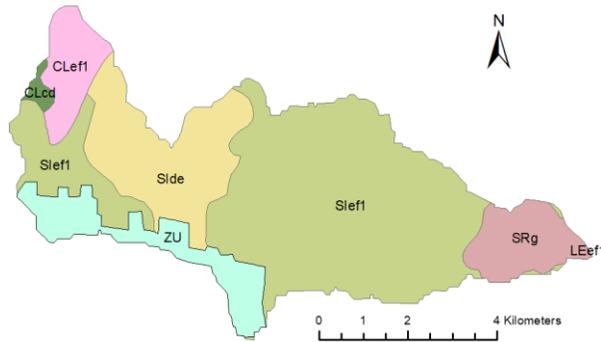


Figura 2. Mapa de suelos. Fuente: adaptado del IGAC [19].

- Andisoles (Slef1): Cubren gran parte de la zona de estudio, se ubican en la parte alta y media de la cuenca. Son suelos profundos, bien drenados, texturas arenosas a franco arcillosas, ácidos a ligeramente ácidos; limitados por fuertes pendientes, con alta susceptibilidad a la erosión. Suelos con evolución baja a moderada, originados a partir de cenizas volcánicas que han desarrollado propiedades ándicas como baja densidad aparente, variados contenidos de vidrio volcánico, contenidos específicos de hierro+aluminio y alta retención de fosfatos [23].
- Entisoles (Side). Se ubican en los márgenes de la quebrada Olivares-Minitas, principalmente hacia la zona norte y sur. Suelos profundos a moderadamente profundos, bien drenados, texturas franco-arenosas a franco arcillosas, ácidos a ligeramente ácidos, limitado por fuertes pendientes, con susceptibilidad a la erosión y a restricciones de tipo climático tales como bajas temperaturas y ocurrencia de heladas [23].

2.2.2. Coberturas

Para la realización del mapa de cobertura de suelos se utilizó como insumo el mapa de coberturas de la cuenca del río Chinchiná [24], donde se observa que la mayor parte de la cuenca de la quebrada Olivares-Minitas (26%) tiene una cobertura de bosque fragmentado con pastos y cultivos, ubicados en la zona media. Seguido por una cobertura de tejido urbano continuo (18.9%), que representa la zona urbana de la ciudad de Manizales, ubicada al sureste de la cuenca (Figura 3).

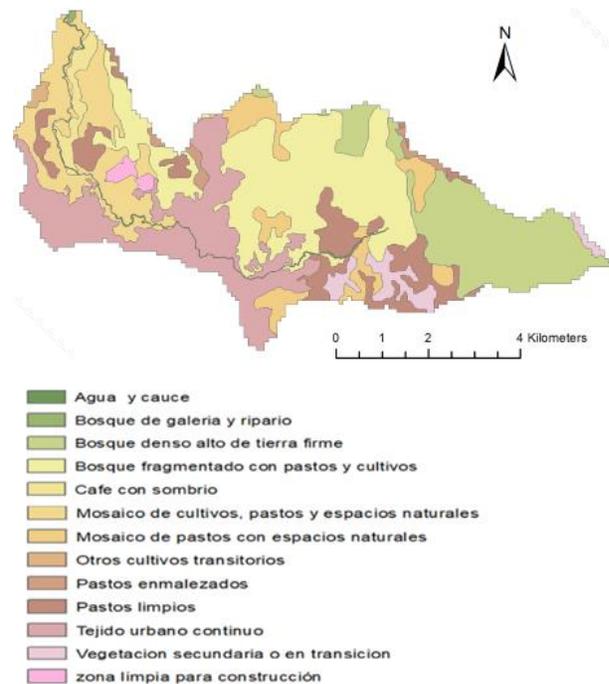


Figura 3. Mapa de coberturas. Fuente: adaptado del IGAC [19].

2.2.3. Estrategias de gestión natural de inundaciones

Se determina que el principal factor que afecta a la quebrada Olivares-Minitas son las acciones invasivas que el hombre ha realizado sobre su cuenca; en efecto, investigaciones realizadas en los últimos años [25], [26], [27], [28], concluyen que las inundaciones aumentan no por la variación en la intensidad de los eventos de lluvia, si no principalmente, por el deterioro de las cuencas hidrográficas debido a la intervención humana.

En los múltiples recorridos realizados por la orilla del cauce y sus llanuras de inundación, se observa que el cauce se ha profundizado debido a la extracción de sedimentos realizada durante muchos años por mineros

informales, también se ha limitado el espacio fluvial por la construcción de puentes ya que sus cimientos ocupan parte del canal. Pero en general, se observa que, en la cuenca en su totalidad, el ciclo hidrológico se ha afectado por el cambio en la cobertura de suelos que en la parte alta ha pasado de bosque a cultivos y pastoreo y en la parte media y baja por urbanización y cultivos.

Así, las alternativas propuestas para mitigar las inundaciones y gestionarlas de una manera más natural, deben enfocarse en hacer que la quebrada recupere muchas de las funciones que se han menoscabado; por lo que se propone tres alternativas como son: 1) Eliminar obstrucciones, ampliar luces de puentes y gálibos estrechos; 2) Cambios en la cobertura vegetal, reforestando ciertas zonas de la cuenca y 3) Reconectar el cauce y sus llanuras de inundación.

2.2.4. Eliminar obstrucciones

A lo largo de la quebrada se identificaron once (11) puentes vehiculares y peatonales con luces y gálibos estrechos, algunas de ellas con los cimientos en el propio cauce [29]; estas estructuras con sus restringidas dimensiones limitan el espacio transversal por el cual deben fluir las aguas, haciendo que la dinámica natural del cauce se distorsione y remanse al toparse con los obstáculos, lo que genera inundaciones aguas arriba.

El efecto mencionado se puede describir detalladamente mediante las simulaciones realizadas en este estudio, al compararlas con los resultados obtenidos al eliminar las obstrucciones. En el modelo computacional, se simuló la topografía original del terreno, sin las estructuras presentes, con el propósito de ejecutar simulaciones sin estas y observar cómo afectaría el comportamiento del flujo.

La aplicación práctica de esta alternativa no significa que deban eliminarse todos los puentes, sino que es necesario ampliar sus luces y gálibos de manera que sus exiguas dimensiones no interfieran con la dinámica de la quebrada.

2.2.5. Cambios en la cobertura vegetal

La cobertura de una cuenca juega un papel primordial ya que intercepta el agua y afecta la velocidad con que discurre por el terreno; en la modelación hidráulica el tipo de vegetación o cobertura se ve representada por el coeficiente “n” de *Manning* que determina que tan fácil puede discurrir el agua en la cuenca. Para este estudio se propone modificar la cobertura vegetal reforestando zonas de la parte alta y media de la cuenca Olivares-Minitas que actualmente tienen pastos limpios y

mosaico de cultivos y pastos (ver [Figura 4](#)); no solo con el objetivo de disminuir las inundaciones, sino de paso conservar el recurso hídrico y su calidad.

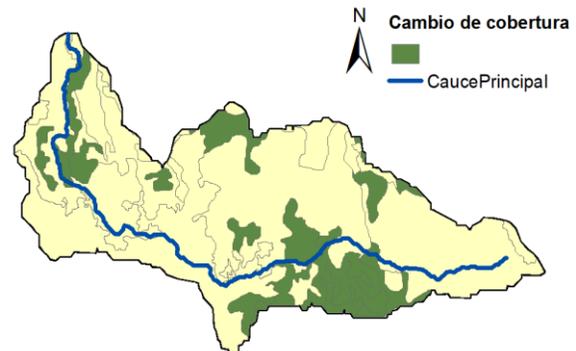


Figura 4. Mapa de cambio de cobertura.

Tras las modelaciones con el estado actual de la cuenca y para observar el efecto del cambio de cobertura que se plantea, se varió el coeficiente “n” de *Manning* de las zonas que se propone reforestar (Zonas en verde de la [Figura 4](#)), asignando a estas un valor 0.075 que representa una vegetación natural de bosque de galería, según los valores obtenidos en la calibración y validación del modelo.

2.2.6. Reconexión del cauce con sus llanuras de inundación

Las llanuras de inundación son áreas planas ubicadas a uno u otro lado de un cauce en los cuales el agua -en caso de inundación- se deposita e infiltra, limitando con ello sus efectos aguas abajo. Pero al estar desconectadas del cauce, se pierden estos espacios de disipación de energía y merma de velocidad y de caudal, lo cual repercute con inundaciones más graves aguas abajo. Así, la importancia de reconectar estos espacios radica en restablecer la conectividad hidráulica, hidrológica y geomorfológica río-llanura de inundación, conduciendo al mejoramiento de la calidad ambiental y la recuperación de la capacidad de laminación del sistema fluvial, permitiendo reducir el riesgo por inundación [30].

A lo largo de la ronda hídrica de la quebrada Olivares-Minitas se identifican sectores donde el cauce se encuentra incidido, es decir a un nivel más profundo que sus llanuras de inundación, por ende, desconectado; proceso que se ha dado por la continua extracción de áridos realizada desde hace muchos años en el cauce. Además, la quebrada no cumple con su ronda hídrica ya que se encuentra limitada por construcciones que no respetan el espacio que está debe tener para llevar a cabo su dinámica fluvial.

Con el objetivo de ilustrar la reconexión de las llanuras con el cauce, se modificará el modelo digital de terreno suavizando la pendiente de las zonas identificadas en la [Figura 5](#), para conectar el río con sus espacios de inundación, que permiten la disipación de energía del flujo.



Figura 5. Zonas de conexión de llanuras de inundación.
Fuente: adaptado de Google Earth [31].

2.3. Modelo

Un modelo hidráulico o hidrológico es la reproducción digital de fenómenos, estados o procesos relevantes del agua [32] que, en el caso de un cauce o drenaje, busca reproducir y prever el comportamiento del fluido ante determinadas condiciones; en este caso, reproducir o modelar las crecientes que se suceden en la quebrada Olivares-Minitas, buscando mitigarlas a través de estrategias de gestión natural de inundaciones.

Los componentes más importantes en los modelos hidrológicos para escenarios cortos son: la precipitación presentada en hietogramas, las pérdidas iniciales representadas en almacenamientos de agua superficiales según la topografía del terreno y la infiltración representada por el número de curva, dependiente de la tipología del suelo.

Los modelos hidráulicos de ríos requieren tres componentes principales: caudal de entrada (establecido en la modelación hidrológica); topografía de la zona, representada en un modelo digital del terreno y rugosidad de la superficie del suelo, dada por el coeficiente “n” de *Manning*.

2.3.1. Modelo digital de elevación y malla

El modelo del terreno o modelo digital de elevación de la quebrada Olivares-Minitas (ver [Figura 6](#)) se construyó a partir imágenes satelitales obtenidas del visor *Land Viewer* [33] con celdas de tamaño 9.5 m x

9.5 m, densificadas en la zona urbana y sobre todo en la zona cercana al cauce con curvas de nivel metro a metro -gracias a las imágenes suministradas por MASORA, empresa que realiza la actualización catastral del municipio de Manizales-. Estas dos informaciones se unieron y el resultado se rasterizó para construir un modelo de elevación de terreno con mejor precisión.

Para lograr una representación precisa de la geometría, crucial en la modelación hidráulica, optamos por utilizar una malla no estructurada. Esta malla está compuesta por elementos irregulares que permiten una representación más fiel de la geometría del modelo, subdivididos en elementos de diversos tamaños según sea necesario.

En las zonas más cercanas al cauce se trabaja con elementos de 1 m de lado o máximo 3 m de lado, en las llanuras de inundación con elementos de máximo 5 m de lado y en la medida que aumenta la distancia a la quebrada se trabajaron elementos de lados 10, 20, 60 y 120 m, debido a que en estas zonas no es relevante una precisión topográfica, los tamaños empleados se aprecian en la [Figura 7](#).

2.3.2. Infiltración por número de curva

Para simular la parte de la lluvia que se infiltra, se utiliza el método del número de curva, que utiliza para su cálculo los datos de tipología de suelo y cobertura subdivididos en los siguientes grupos [35]:

- a) Menor potencial de escorrentía: incluye arenas profundas con muy poco limo y arcilla, también loess profundo y rápidamente permeable.
- b) Potencial de escorrentía moderadamente bajo: en su mayoría suelos arenosos menos profundos que los del grupo A, el grupo en su conjunto tiene una infiltración superior a la media después de una humectación completa.
- c) Potencial de escorrentía moderadamente alto: comprende suelos poco profundos que contienen una cantidad considerable de arcilla y coloides, aunque menos que los del grupo D. El grupo tiene una infiltración por debajo del promedio después de la pre-saturación.
- d) Mayor potencial de escorrentía: Incluye principalmente arcillas de alto porcentaje de expansión, pero el grupo también incluye algunos suelos poco profundos con subhorizontal casi impermeables cerca de la superficie.

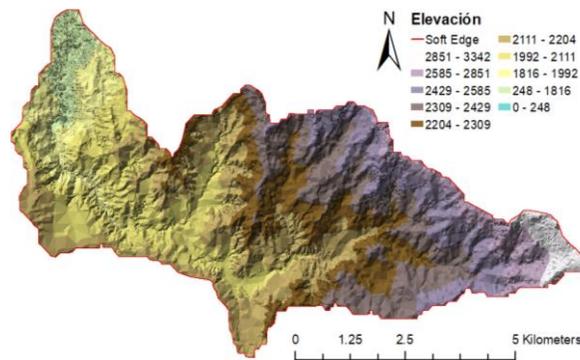


Figura 6. Mapa de elevación digital. Fuente: adaptado del DEM de la NASA [34].

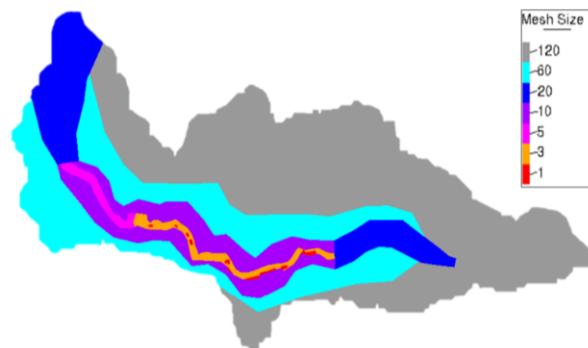


Figura 7. Tamaños de malla.

Para los números de curva según tipo de suelo y cobertura se utilizaron las tablas del “Hydrology National Engineering Handbook” [15], el ponderado de las áreas arroja un valor inicial de número de curva de 64.

2.3.3. Coeficiente de rugosidad de Manning

Para esta modelación, se trabajan los coeficientes de rugosidad presentes en el la Guía Metodológica para el desarrollo del Sistema Nacional de Zonas Inundables del Gobierno Español [17]. Este coeficiente se utiliza como parámetro de calibración y los iniciales se varían según sea necesario con el fin de ajustar el modelo. Los factores iniciales se encuentran transcritos en la **Tabla 2**:

2.3.4. Precipitación

Para el cálculo de la precipitación en la cuenca se empleó el método de ajuste por Funciones de Distribución de Probabilidad, que dan forma a los datos reales con los que se cuentan y permiten extrapolar una función modelada por series de lluvia.

Tabla 2. Coeficientes de rugosidad de Manning

Tipo de cobertura	n de Manning
Bosque de galería y ripario	0.06
Bosque denso alto de tierra firme	0.07
Bosque fragmentado con pastos y cultivos	0.07
Café con sombrío	0.035
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	0.035
Mosaico de pastos con espacios naturales	0.035
Otros cultivos transitorios	0.035
Pastos enmalezados	0.055
Pastos limpios	0.035
Ríos	0.04
Tejido urbano continuo	0.1
Tejido urbano discontinuo	0.09
vegetación secundaria o en transición	0.035
Zonas verdes urbanas	0.09

Posteriormente se calculó el tiempo de concentración de la cuenca utilizando once fórmulas de diferentes autores. Después de descartar los resultados poco probables, se promediaron los valores restantes, obteniendo un tiempo de concentración de 75 minutos.

Finalmente, se ajustó la precipitación empleando los factores de reducción área y temporal, según los coeficientes establecidos para la zona en el libro “Drenaje Urbano en Colombia” que se encuentra en proceso de imprenta [36].

Se obtuvieron dos lluvias para el área de la cuenca (una por cada estación hidrometeorológica utilizada), y se calcularon para periodos de retorno de 5, 25, 50 y 100 años, con el objetivo de ver el comportamiento de la precipitación frente a las estrategias propuestas en escenarios con cantidades de lluvia variadas. Las lluvias diseñadas se presentan en la Figura 8 y la Figura 9.

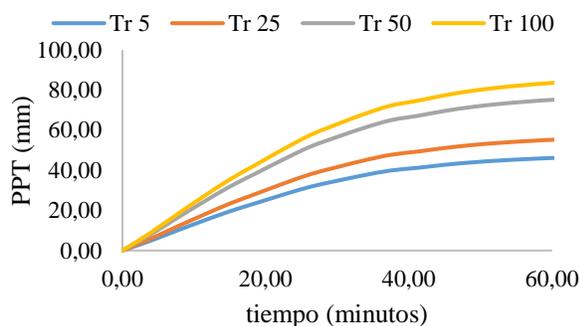


Figura 8. Lluvia acumulada para la estación Aguas de Manizales.

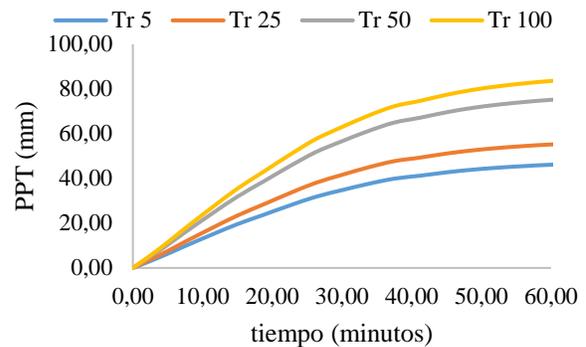


Figura 9. Lluvia acumulada para la estación tesorito.

2.4. Modelo calibración y validación

Buscando que el modelo represente de manera acertada las inundaciones, con base en la información hidrológica existente, se seleccionaron los eventos de lluvia que originaron caudales mayores a $100 \text{ m}^3/\text{s}$ en el punto de medición de nivel “Aguas de Manizales”, empleándose cuatro eventos para calibrar el modelo (Tabla 3) y otros cuatro para su validación (Tabla 4).

Con el fin de representar la variabilidad espacial de la lluvia y para simular las tormentas se utilizaron datos de tres estaciones diferentes: Aguas de Manizales, El Popal y Bocatoma; los hietogramas fueron obtenidos del Centro de Datos e Indicadores Ambientales de Caldas – CDIAAC [37].

Tabla 3. Lluvias seleccionadas para calibración

Fecha	No.	PPT (mm) por estación			Duración [min]
		Bocatoma Olivares	El Popal Olivares	Aguas de Manizales	
7/12/2017	1	6.8	53.6	37.6	125
23/11/2017	2	7.6	47.4	34.2	240
16/03/2019	3	31.4	34.8	33	95
12/05/2020	4	25.2	38	23.6	263

Tabla 4. Lluvias seleccionadas para validación

Fecha	No.	PPT (mm) por estación			Duración [min]
		Bocatoma Olivares	El Popal Olivares	Aguas de Manizales	
16/04/2017	1	30.8	22.4	14	65
7/11/2017	2	38.8	34.2	31.6	143
2/05/2018	3	36.4	26.4	21	140
17/04/2019	4	6.2	27.4	34.2	200

Tras la modificación de parámetros -a prueba y error- pero teniendo en cuenta que estos deben tener sentido físico, se determinó el número de curva ponderado para la infiltración en la cuenca NC de 89 y los valores finales del coeficiente “n” de Manning en la [Tabla 5](#).

Tabla 5. Valores para el coeficiente “n” de Manning tras la calibración

Tipo de cobertura	Manning
Bosque de galería y ripario	0.06
Bosque denso alto de tierra firme	0.07
Bosque fragmentado con pastos y cultivos	0.07
Café con semisombra	0.035
Café con sombrío	0.035
Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales	0.035
Mosaico de pastos con espacios naturales	0.035
Otros cultivos transitorios	0.035
Pastos enmalezados	0.055
Pastos limpios	0.035
Ríos	0.04
Tejido urbano continuo	0.08
Tejido urbano discontinuo	0.075
Vegetación secundaria o en transición	0.035
Zonas verdes urbanas	0.09

Para comparar los resultados se utilizan datos presentes en el CDIAE en [37], donde se encuentran los hidrogramas de la estación Aguas de Manizales para los eventos modelados.

En la [Tabla 6](#) se presentan los datos obtenidos a partir de las modelaciones de los eventos de calibración y su comparación con los datos reales medidos en campo, los resultados muestran una adecuada representación de los caudales pico y sus respectivos tiempos. Los índices obtenidos para cada evento varían en un rango de 0.82 a 0.95, que representan un excelente ajuste según los rangos del índice NASH- Sutcliffe [38].

Tabla 6. Datos de la calibración

No	Caudal punta		Tiempo pico		NASH-Sutcliffe	% error Q punta [%]
	(m ³ /s)		(s)			
	Observado	Simulado	Observado	Simulado		
1	142.71	132.76	1800	900	0.95	7
2	142.71	124.68	7200	7200	0.82	13
3	102.03	88.97	2700	2700	0.93	13
4	100.06	97.64	8100	9000	0.88	2

En las [Figuras 10, 11, 12 y 13](#) se muestra la comparación de los caudales observados y los caudales reales para los eventos de lluvia de calibración, de estos se puede inferir un adecuado ajuste gráfico, dado que el caudal simulado representa apropiadamente los picos de caudal observados y los tiempos a los que se presentó el pico.

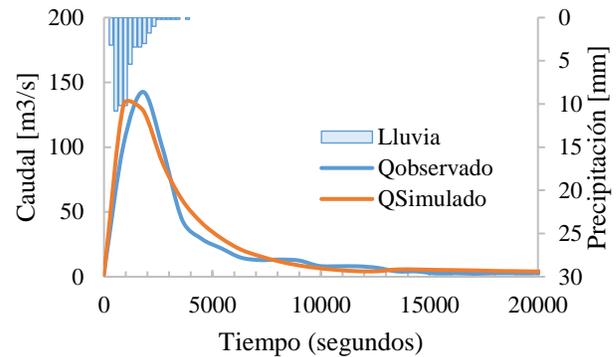


Figura 10. Evento No. 1 Calibración.

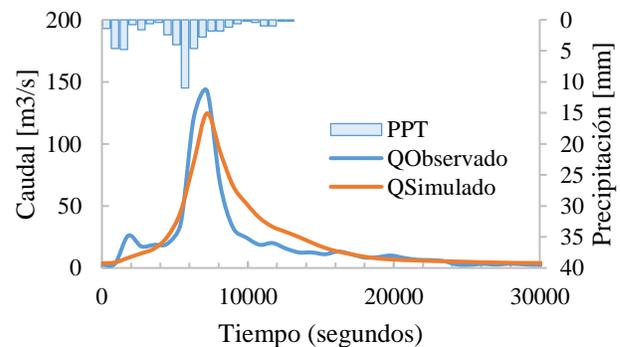


Figura 11. Evento No. 2 Calibración.

En la [Tabla 7](#) se presentan los datos obtenidos a partir de las modelaciones de los eventos de validación y su comparación con los datos reales medidos en campo, los resultados muestran una adecuada representación de los caudales pico y sus respectivos tiempos.

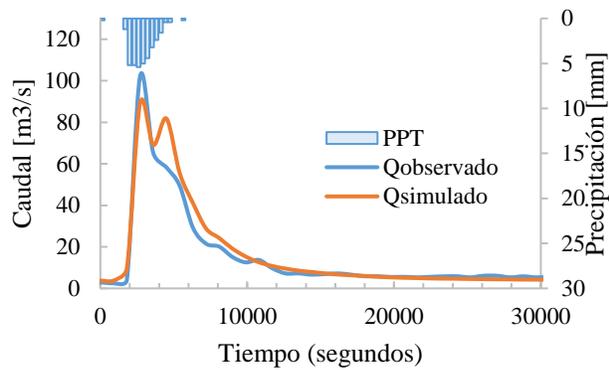


Figura 12. Evento No. 3 Calibración.

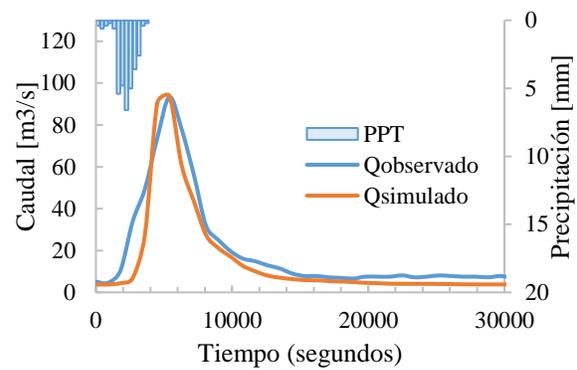


Figura 14. Evento No. 1 Validación.

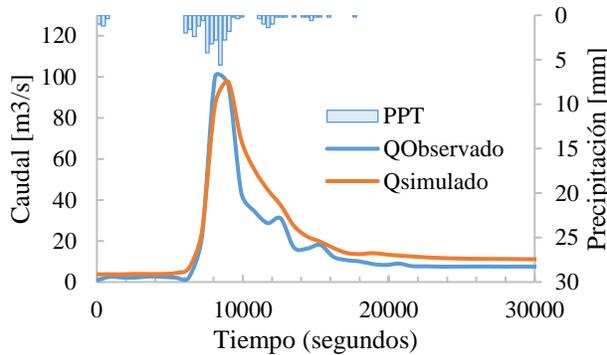


Figura 13. Evento No. 4 Calibración.

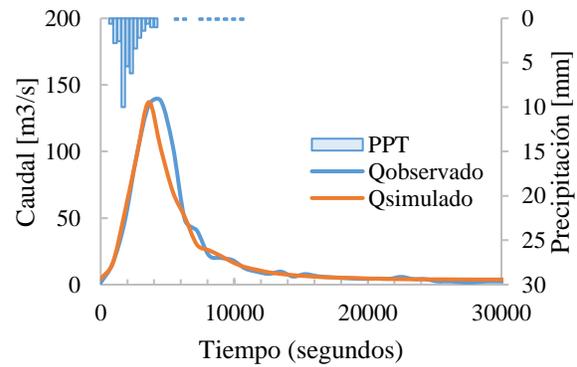


Figura 15. Evento No. 2 Validación.

Los índices obtenidos para cada evento varían en un rango de 0.63 a 0.93, dichos valores representan un buen ajuste según los estándares del índice de Nash-Sutcliffe [38]. De igual manera se muestra que el porcentaje de error en los caudales punta es aceptable según los rangos establecidos, esto indica una correcta interpretación de los eventos de lluvia modelados.

Las simulaciones realizadas para la validación del modelo arrojan que los datos representados en la Figura 14, Figura 15, Figura 16 y la Figura 17, donde se comparan los caudales observados y los caudales reales para los eventos de lluvia de validación, poseen un adecuado ajuste gráfico, puesto que el caudal simulado representa apropiadamente los picos de caudal observados y los tiempos en que se presentó el pico.

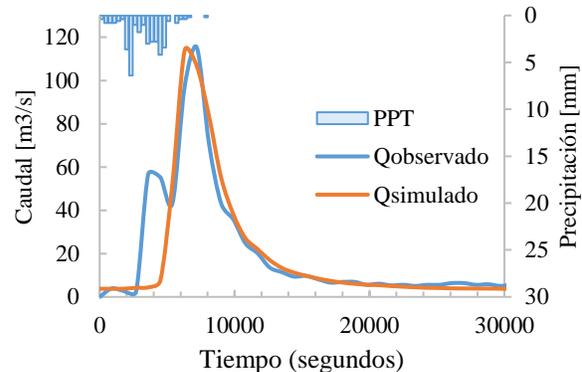


Figura 16. Evento No. 3 Validación.

Tabla 7. Datos de la Validación

No	Caudal punta		Tiempo pico		NASH-Sutcliffe	% error Q Punta [%]
	(m ³ /s)		(s)			
	Observado	Simulado	Observado	Simulado		
1	93.32	93.94	5400	5400	0.93	0.7
2	138.13	137.08	4500	3600	0.84	0.8
3	115.24	113.85	7200	6300	0.83	1.2
4	95.23	76.32	16200	16200	0.63	19.9

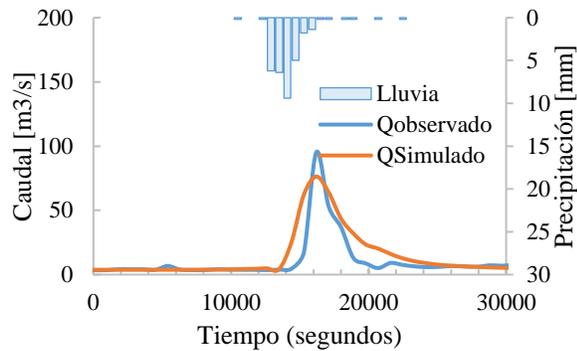


Figura 17. Evento No. 4 Validación.

2.5. Escenarios propuestos

Se modelaron 5 escenarios diferentes:

- Escenario base (No.0): sin ninguna modificación de topografía rugosidad o infiltración, este escenario indica el punto de comparación para los otros y representa la realidad actual de la quebrada.
- Escenario No. 1: corresponde a la eliminación de obstrucciones, mediante ampliación de gálibos de los puentes y estructuras que estrechan el cauce.
- Escenario No. 2: plantea el cambio de cobertura en ciertas áreas de la cuenca, con el objetivo de reforestar zonas de pastos.
- Escenario No. 3: representa la conexión del cauce con sus llanuras de inundación.
- Escenario No. 4: consiste en la aplicación simultáneas de las 3 alternativas propuestas.

Cada de los escenarios se corrió con lluvias de 4 periodos de retorno distintos (5, 25, 50 y 10 años).

3. Resultados

Los resultados se muestran a través de la [Tabla 8](#), [Tabla 9](#), [Tabla 10](#), [Tabla 11](#), [Tabla 12](#), [Tabla 13](#), con los datos que representan la variación del caudal en un punto específico ubicado en una zona monitoreada en la cuenca. Estos datos son el caudal pico, el tiempo pico y el volumen total de caudal.

La alternativa individual que muestra mejores resultados para la disminución del caudal pico es el No. 3 que corresponde a la reconexión del cauce con sus llanuras de inundación, presenta en promedio una reducción del 24%, esta alternativa tiene la eficacia más alta en caudales con periodo de retorno de 5 años. Aplicando simultáneamente las 3 alternativas se logra reducir el caudal pico hasta en un 52% para Tr de 5 años, y en promedio se reduce el caudal pico en un 39%.

Tabla 8. Datos de caudal punta [m^3/s] para las modelaciones

Periodo de retorno	Escenarios				
	Base	1	2	3	4
Tr 5	183.6	167.9	134.7	113.1	88.9
Tr25	246.3	239.6	215.1	186.6	139.1
Tr 50	344.6	331.5	277.9	275.9	234.2
Tr 100	378.1	364.8	344.2	329.3	264.2

Tabla 9. Datos de variación porcentual del caudal punta para las modelaciones

Periodo de retorno	Escenarios				
	Base	1	2	3	4
Tr 5	100.0%	-8.6%	-26.7%	-38.4%	-51.6%
Tr25	100.0%	-2.7%	-12.7%	-24.2%	-43.5%
Tr 50	100.0%	-3.8%	-19.3%	-19.9%	-32.0%
Tr 100	100.0%	-3.5%	-9.0%	-12.9%	-30.1%
Promedio	100.0%	-4.7%	-16.9%	-23.9%	-39.3%

La alternativa individual que muestra mejores resultados para la disminución del caudal pico es el No. 3 que corresponde a la reconexión del cauce con sus llanuras de inundación, presenta en promedio una reducción del 24%, esta alternativa tiene la eficacia más alta en caudales con periodo de retorno de 5 años. Aplicando simultáneamente las 3 alternativas se logra reducir el caudal pico hasta en un 52% para Tr de 5 años, y en promedio se reduce el caudal pico en un 39%.

Tabla 10. Datos de tiempo punta [s] para las modelaciones

Periodo de retorno	Escenarios				
	Base	1	2	3	4
Tr 5	4500	4500	5400	5400	6300
Tr25	3600	3600	4500	4500	5400
Tr 50	3600	3600	3600	3600	4500
Tr 100	3600	3600	3600	3600	4500

En cuanto al retraso del tiempo pico, la alternativa No. 1 no presenta ninguna alteración ya que eliminar obstrucciones favorece el paso del flujo y no lo frena en ningún momento. Las alternativas 2 y 3 retrasan el tiempo pico de caudales de periodos de retorno hasta los 25 años, retrasándolos entre un 20% y 25%, en cuanto a caudales mayores no se presenta ningún efecto visible.

Sin embargo, la aplicación de las 3 alternativas en simultaneo si presenta retrasos en los tiempos picos para los caudales de todos los periodos de retorno, retrasándolos en promedio un 35%.

Tabla 11. Datos de variación porcentual del tiempo punta para las modelaciones

Periodo de retorno	Escenarios				
	Base	1	2	3	4
Tr 5	0.0%	0.0%	-20.0%	-20.0%	-40.0%
Tr25	0.0%	0.0%	-25.0%	-25.0%	-50.0%
Tr 50	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	-25.0%
Tr 100	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	-25.0%
Promedio	0.0%	0.0%	-11.3%	-11.3%	-35.0%

En cuanto al retraso del tiempo pico, la alternativa No. 1 no presenta ninguna alteración ya que eliminar obstrucciones favorece el paso del flujo y no lo frena en ningún momento. Las alternativas 2 y 3 retrasan el tiempo pico de caudales de periodos de retorno hasta los 25 años, retrasándolos entre un 20% y 25%, en cuanto a caudales mayores no se presenta ningún efecto visible. Sin embargo, la aplicación de las 3 alternativas en simultaneo si presenta retrasos en los tiempos picos para los caudales de todos los periodos de retorno, retrasándolos en promedio un 35%.

Tabla 12. Datos de volumen total [1000 m³] para las modelaciones

Periodo de retorno	Escenarios				
	Base	1	2	3	4
Tr 5	1837.3	1775.6	1548.3	1667.1	1395.9
Tr25	2531.5	2421.0	2131.3	2246.7	2031.8
Tr 50	2944.2	2909.3	2406.3	2635.4	2497.1
Tr 100	3232.4	3178.0	2603.1	2965.4	2764.2

Tabla 13. Datos de variación porcentual de volumen total para las modelaciones

Periodo de retorno	Escenarios				
	Base	1	2	3	4
Tr 5	0.0%	3.4%	15.7%	9.3%	24.0%
Tr25	0.0%	4.4%	15.8%	11.3%	19.7%
Tr 50	0.0%	1.2%	18.3%	10.5%	15.2%
Tr 100	0.0%	1.7%	19.5%	8.3%	14.5%
Promedio	0.0%	2.6%	17.3%	9.8%	18.4%

En cuanto a la reducción de los volúmenes de caudal la alternativa individual que mejores resultados presenta es la No.2 que corresponde a la reforestación de ciertas áreas de la cuenca, muestra una reducción de volumen de en promedio un 17%, este efecto se esperaba ya que el cambio de cobertura altera también la infiltración en el terreno.

En los hidrogramas para periodo de retorno de 5 años (véase Figura 18) se evidencia que la aplicación de la alternativa No. 1 no muestra cambios significativos en la forma del hidrograma, solo una pequeña disminución del caudal y un adelanto en la forma, esto sucede debido a que sin las contracciones el flujo puede fluir con mayor facilidad.

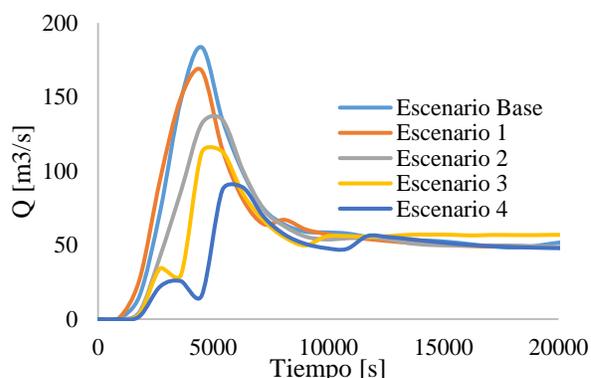


Figura 18. Hidrograma para Tr de 5 años.

En la alternativa No.2 se observa cómo se achata el hidrograma, lo que disminuye el caudal pico y retarda el tiempo punta. La alternativa No. 3 presenta efectos similares en forma, la caudal punta es el menor entre las 3 alternativas individuales, el tiempo al pico se retrasa respecto al escenario base, sin embargo, se muestra un poco adelantado respecto a la alternativa No. 2. El escenario No. 4 presenta los mejores resultados, disminuyendo notablemente el caudal pico y con sustanciales retrasos del tiempo punta.

En los hidrogramas para Tr de 25 años (véase Figura 19) se muestran resultados similares a los de los hidrogramas para Tr 5 de años, sin embargo, los efectos en atenuación del caudal pico se encuentran menos marcados, el efecto contrario se presenta en el retraso de los tiempos punta, que se hace más evidente para la lluvia de Tr 25 años.

En los hidrogramas para Tr de 50 años (véase Figura 20), se muestran reducciones del caudal pico en todas las alternativas. Individualmente la mejor alternativa para este periodo de retorno es la No. 3 que corresponde a la reconexión del cauce con sus llanuras de

inundación. En cuanto al retraso de los tiempos punta, se evidencia que estos no se presentan en la aplicación de alternativas individuales, únicamente se muestra retraso del tiempo punta para el escenario No. 4, donde se aplican las 3 alternativas en simultáneo.

Para los hidrogramas de Tr 100 años (véase Figura 21), se muestran efectos similares que para los de Tr 50 años, solo que el efecto de atenuación de caudales se ve menos marcado. El efecto en retraso de tiempo punta presenta las mismas características que para el Tr 50 años.

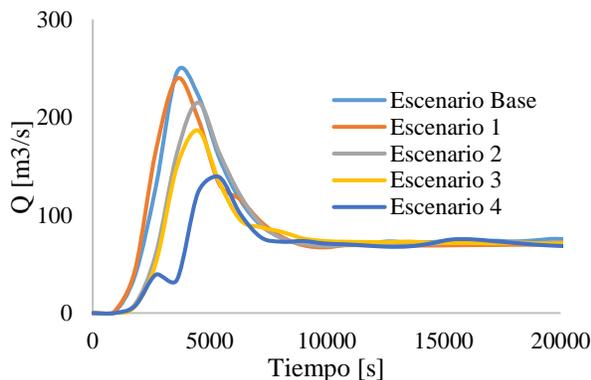


Figura 19. Hidrograma para Tr de 25 años.

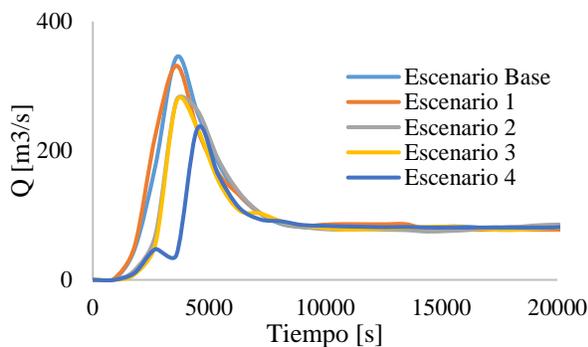


Figura 20. Hidrograma para Tr de 50 años.

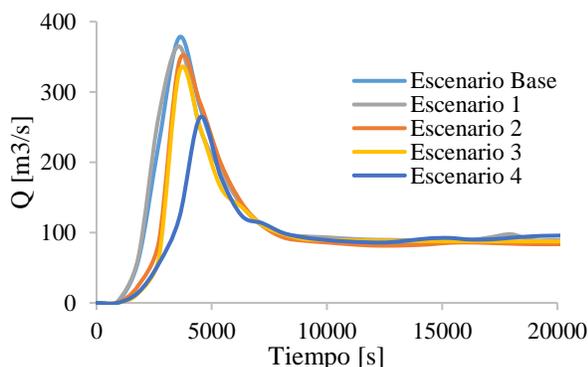


Figura 21. Hidrograma para Tr de 100 años.

4. Conclusiones

Las estrategias naturales aplicadas en la gestión de inundaciones han demostrado ser efectivas según las conclusiones obtenidas. La estrategia más efectiva para reducir el caudal pico en todos los periodos de retorno es la reconexión del cauce con sus llanuras de inundación (Alternativa No. 3). Las alternativas No. 2 y No. 3 presentan efectos idénticos en el retraso de los tiempos de los hidrogramas, logrando este retraso en periodos de retorno de hasta 25 años. En cuanto a la disminución del volumen total, la mejor alternativa es el cambio de cobertura por medio de reforestación a partir de la Alternativa No. 2. Aunque la eliminación de obstrucciones en el cauce tiene un impacto en la reducción del caudal pico, su efecto no es tan significativo como otras alternativas. No presenta disminuciones en el tiempo pico, y en cuanto al volumen total, solo disminuyen en promedio en un 2.6%. El estudio concluye que gestionar las inundaciones mediante soluciones naturales es posible y efectivo, especialmente mediante la rehabilitación y recuperación del cuerpo hídrico y su ecosistema. Los resultados son particularmente positivos para las alternativas que implican la conexión de llanuras de inundación y el cambio de vegetación.

Se recomienda Implementar en la quebrada Olivares-Minitas las estrategias de gestión natural de inundaciones propuestas, ya que se demostró que todas presentan buenos resultados. En orden de prioridad estas serían: reconexión de llanuras de inundación, cambio en la cobertura vegetal y eliminación de obstrucciones en el cauce. Estas estrategias reducirían los picos de caudal, retrasarían los tiempos en que este se presenta y generarían un impacto en el ecosistema de la quebrada que ayudaría a su recuperación

Para dar continuidad a esta investigación, se recomienda probar el efecto de otras alternativas de gestión natural de inundaciones (por ejemplo, reconexión de viejos canales y humedales y otras reconexiones de llanuras) con el fin de reducir los caudales punta y la amplitud de las manchas de inundación.

Financiación

Fondo de Becas Manizales Más Innovadora, de la Alcaldía de Manizales y la Universidad Nacional de Colombia -Manizales Campus Universitario.

Agradecimientos

A la Asociación de Municipios del Altiplano del Oriente Antioqueño “Masora”.

Contribución de los autores

L. Parra-Gómez: Conceptualización, Metodología, Validación, Análisis formal, Investigación, Recursos, Curación de datos, Escritura- borrador original, Visualización, Adquisición de fondos. R. Franco-Idárraga: Redacción - revisión y edición, Supervisión.

Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Conflicto de interés

Los autores declaran que no tienen intereses financieros en competencia ni relaciones personales conocidas que pudieran haber influido en el trabajo presentado en este artículo.

Declaración de la Junta de Revisión Institucional

No aplica.

Declaración de consentimiento informado

No aplica.

Referencias

- [1] Ministerio de Ambiente, *Estudio Nacional del Agua 2018*. 2019.
- [2] O. Iacob, J. S. Rowan, I. Brown, C. Ellis, “Evaluating wider benefits of natural flood management strategies: an ecosystem-based adaptation perspective,” pp. 774–787, 2014, doi: <https://doi.org/10.2166/nh.2014.184>
- [3] A. Kumar, “The rights of rivers,” *Our Planet*, vol. 2017, no. 2, pp. 40–41, 2018, doi: <https://doi.org/10.18356/107E0E5A-EN>
- [4] T. Wingfield, N. Macdonald, K. Peters, J. Spees, K. Potter, “Natural Flood Management: Beyond the evidence debate,” *Area*, vol. 51, no. 4, pp. 743–751, 2019, doi: <https://doi.org/10.1111/area.12535>
- [5] European Environment Agency, “Nature-based solutions in Europe: Policy, knowledge and practice for climate change adaptation and disaster risk reduction,” 2021, doi: <https://doi.org/10.2800/919315>
- [6] S. Han, C. Kuhlicke, “Barriers and Drivers for Mainstreaming Nature-Based Solutions for Flood Risks: The Case of South Korea,” *International Journal of Disaster Risk Science*, vol. 12, no. 5, pp. 661–672, 2021, doi: <https://doi.org/10.1007/s13753-021-00372-4>
- [7] C. Short, L. Clarke, F. Carnelli, C. Uttley, B. Smith, “Capturing the multiple benefits associated with nature-based solutions: Lessons from a natural flood management project in the Cotswolds, UK,” *Land Degrad Dev*, vol. 30, no. 3, pp. 241–252, 2019, doi: <https://doi.org/10.1002/ldr.3205>
- [8] F. Turkelboom, R. Demeyer, L. Vranken, P. De Becker, F. Raymackers, L. De Smet, “How does a nature-based solution for flood control compare to a technical solution? Case study evidence from Belgium,” *Ambio*, vol. 50, no. 8, pp. 1431–1445, 2021, doi: <https://doi.org/10.1007/s13280-021-01548-4>
- [9] M. Sanz-Ramos et al., “Iber v3. Manual de referencia e interfaz de usuario de las nuevas implementaciones,” 2022. [Online]. Available: https://www.scipedia.com/public/Sanz-Ramos_et_al_2022b
- [10] C. A. Caro Camargo, “Modelación hidrológica distribuida basada en esquemas de volúmenes finitos,” tesis doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, 2015.
- [11] F. Andrés and Y. Amaya, “Estudio hidráulico del meandro del río Magdalena, municipio de La Dorada Caldas,” trabajo fin de master, Universidad Nacional de Colombia, 2019.
- [12] United States Department of Agriculture, “Estimation of Runoff by using SCS Curve Number Method and Arc GIS,” *Int J Sci Eng Res*, vol. 5, no. 7, 2014.
- [13] United States Department of Agriculture, “Chapter 10 Estimation of Direct Runoff from Storm Rainfall,” Jul. 2004.
- [14] Á. Díaz Carvajal, T. Mercado Fernández, “Obstacle detection system with Scanner,” *Ingeniería y Desarrollo*, vol. 32, no. 2, pp. 200–217, 2014, doi: <https://doi.org/10.14482/inde.32.2.5406>
- [15] United States Department of Agriculture, “Hydrologic Soil-Cover Complexes Rain clouds Cloud formation,” Jul. 2004.

- [16] M. G. Osío Yépez, E. G. Valencia Ventura, H. Cartaya, “Cálculo del coeficiente de rugosidad ‘n’ de Manning en los grandes ríos de Venezuela,” *Ingeniería UC*, vol. 7, 2000.
- [17] Ministerio de Medio Ambiente, “Guía Metodológica para el desarrollo del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables,” Gobierno de España, 2011.
- [18] I. D. E. A. – IDEA, “Operación y mantenimiento preventivo y correctivo a las redes hidrometeorológicas, de calidad del aire y sísmica en el departamento de Caldas,” Manizales, Caldas, 2019.
- [19] IGAC, “Datos Abiertos Agrología GEOPORTAL,” 2019. [Online]. Available: <https://geoportall.igac.gov.co/contenido/datos-abiertos-agrologia>
- [20] CORPOCALDAS, “Plan de manejo. Reserva forestal protectora de las cuencas hidrográficas de Río Blanco y quebrada Olivares,” p. 145, 2010.
- [21] IDEAM, “9. clasificación de los climas,” 2013.
- [22] F. M. Fernández, “Apuntes Sobre el Clima en Manizales,” 2008.
- [23] H. González, “Memoria explicativa-Geología de las planchas 206 Manizales y 225 nevado del Ruíz,” Manizales, 2001.
- [24] CORPOCALDAS, “Uso Cobertura Suelo Cuenca Chinciná,” 2018. [Online]. Available: <http://190.0.61.202:8085/#/viewer?id=118>
- [25] C. Mbow, A. Diop, A. T. Diaw, C. I. Niang, “Urban sprawl development and flooding at Yeumbeul suburb (Dakar-Senegal),” *Afr J Environ Sci Tech*, vol. 2, no. 4, pp. 75–088, 2008, [Online]. Available: <http://www.academicjournals.org/AJest>
- [26] A. Mustafa et al., “Effects of spatial planning on future flood risks in urban environments,” *J Environ Manage*, vol. 225, pp. 193–204, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.07.090>
- [27] E. Zúñiga, V. Magaña, and V. Piña, “Effect of urban development in risk of floods in Veracruz, Mexico,” *Geosciences*, vol. 10, no. 10, pp. 1–14, Oct. 2020, doi: <https://doi.org/10.3390/geosciences10100402>
- [28] D. M. Rey Valencia, J. D. C. Zambrano Nájera, “Estudio de la respuesta hidrológica en la cuenca urbana de montaña San Luis-Palogrande,” *Revista UIS Ingenierías*, vol. 17, no. 1, pp. 115–126, 2018, doi: <https://doi.org/10.18273/revuin.v17n1-2018011>
- [29] J. R. Rojas Gallejo, M. A. Tobar Valencia, “Inventario de obras de infraestructura en la quebrada Olivares-Minitas,” trabajo de grado, Universidad Católica de Manizales, 2012.
- [30] F. Magdaleno, F. Cortés, J. M. Bodoque, “El proyecto DRAINAGE: restaurando las llanuras de inundación como infraestructuras verdes frente a los riesgos de inundación,” 2019. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/334279289>
- [31] Google Earth, “Imagen satelital.” 2022. [Online]. Available: https://earth.google.com/web/search/Manizales,+Caldas/@5.0686975,-75.483643,2135.33763762a,18524.88471708d,35y,0h,0t,0r/data=CnwaUhJMCiUweDhlNDc2ZmZhNmE0MmNlM2I6MHhhODYzY2Y2NDIzZWExNDJfGTf0u1V8QBRAIacaYmEt4FLAKhFNYW5pemFsZXMsIENhbGRhcxgCIAEiJgokCTF_aa7Q8zJAETF_aa7Q8zLAGV8DWLnBJD5AIS3wt373Y1HAOgMKATA
- [32] M. Castro D, X. Hidalgo B, R. Poveda F, “Sobre la modelación hidráulica en obras de saneamiento básico,” trabajo fin de grado, Universidad Nacional de Chimborazo, 2003.
- [33] Earth Observing System, “Visor de tierras | EOS,” 2022. [Online]. Available: <https://eos.com/landviewer/?s=Sentinel2>
- [34] NASA, “Río Blanco, Colombia - Satellite Images on EOSDA LandViewer.” 2020. [Online]. Available: <https://eos.com/landviewer/?lat=5.07902&lng=-75.37912&z=12>
- [35] United States Department of Agriculture, *National Engineering Handbook*, 2009.
- [36] J. Zambrano Nájera, J. J. Vélez Upegui, “*Drenaje Urbano en Colombia*.” Editorial Universidad Nacional de Colombia, Colombia, 2023.
- [37] Universidad Nacional de Colombia and CORPOCALDAS, “Datos e Indicadores Ambientales de Caldas,” <https://cdiac.manizales.unal.edu.co/indicadores/public/DurationCurve>

[38] E. C. Albuja Silva, D. O. Tenelanda Patiño, “Desarrollo de un modelo conceptual de lluvia-escorrentía para interpretación de procesos hidrológicos en la cuenca altoandina del río Zhurucay.,” proyecto fin de grado, Universidad de Cuenca, Ecuador, 2014.